



国防科技图书出版基金

“十二五”国家重点出版规划项目

航天器和导弹制导、导航与控制

卫星姿态测量与确定

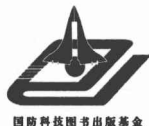
Satellite Attitude Measurement
and Determination

吕振铎 雷拥军 © 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



吕振铎 雷拥军 编著

卫星姿态测量与确定

Satellite Attitude Measurement and Determination



Introduction

Fundations

Attitude Measurement and Determination for Spinning Satellites

Attitude Measurement and Determination for Three-axis Stabilized Satellites

State Estimation Methods for Satellite Attitude Determination

Modeling of Gyros in Attitude Determination

Applications of Kalman Filtering in Satellite Attitude Determination

Satellite Attitude Systems Design



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

卫星姿态测量与确定 / 吕振铎, 雷拥军编著. —北京:
国防工业出版社, 2013. 7

(航天器和导弹制导、导航与控制丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 08805 - 2

I. ①卫... II. ①吕... ②雷... III. ①卫星姿态 -
测量 IV. ①V448.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 152956 号

卫星姿态测量与确定

编 著 者 吕振铎 雷拥军

责 任 编 辑 王 华

出 版 发 行 国防工业出版社(010 - 88540717 010 - 88540777)

地 址 邮 编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号, 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 710 × 960 1/16

印 张 18 $\frac{3}{4}$

印 数 1 - 2500 册

字 数 277 千字

版 印 次 2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 86.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致读者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题

和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委员（按姓氏笔画排序）

才鸿年 马伟明 王小谟 王群书 甘茂治

甘晓华 卢秉恒 巩水利 刘泽金 孙秀冬

陆 军 芮筱亭 李言荣 李德仁 李德毅

杨 伟 肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起 郭云飞

唐志共 陶西平 韩祖南 傅惠民 魏炳波

《航天器和导弹制导、导航与控制》 丛书编委会

顾 问 陆元九* 屠善澄* 梁思礼*

主任委员 吴宏鑫*

副主任委员 房建成
(执行主任)

委员 (按姓氏笔画排序)

| | | | | |
|------|------|------|------|------|
| 马广富 | 王 华 | 王 辉 | 王 巍 | 王子才* |
| 王晓东 | 史忠科 | 包为民* | 邢海鹰 | 孙柏林 |
| 孙承启 | 孙敬良* | 孙富春 | 孙增圻 | 任 章 |
| 任子西 | 向小丽 | 刘 宇 | 刘良栋 | 刘建业 |
| 汤国建 | 严卫钢 | 李俊峰 | 李济生* | 李铁寿 |
| 杨树兴 | 杨维廉 | 吴 忠 | 吴宏鑫* | 吴森堂 |
| 余梦伦* | 张广军 | 张天序 | 张为华 | 张春明 |
| 张弈群 | 张履谦* | 陆宇平 | 陈士橹* | 陈义庆 |

| | | | | |
|------|-----|------|------|------|
| 陈定昌* | 陈祖贵 | 周 军 | 周东华 | 房建成 |
| 孟执中* | 段广仁 | 侯建文 | 姚 郁 | 秦子增 |
| 夏永江 | 徐世杰 | 殷兴良 | 高晓颖 | 郭 雷* |
| 郭 雷 | 唐应恒 | 黄 琳* | 黄培康* | 黄瑞松* |
| 曹喜滨 | 崔平远 | 梁晋才* | 韩 潮 | 曾广商* |
| 樊尚春 | 魏春岭 | | | |

常务委员 (按姓氏笔画排序)

| | | | | |
|-----|------|-----|------|------|
| 孙柏林 | 任子西 | 吴 忠 | 吴宏鑫* | 吴森堂 |
| 张天序 | 陈定昌* | 周 军 | 房建成 | 孟执中* |
| 姚 郁 | 夏永江 | 高晓颖 | 郭 雷 | 黄瑞松* |
| 魏春岭 | | | | |

秘 书 全 伟 宁晓琳 崔培玲 孙津济 郑 丹

注：人名有*者均为院士。

总序

航天器(Spacecraft)是指在地球大气层以外的宇宙空间(太空),按照天体力学的规律运行,执行探索、开发或利用太空及天体等特定任务的飞行器,例如人造地球卫星、飞船、深空探测器等。导弹(Guided Missile)是指携带有效载荷,依靠自身动力装置推进,由制导和导航系统导引控制飞行航迹,导向目标的飞行器,如战略/战术导弹、运载火箭等。

航天器和导弹技术是现代科学技术中发展最快,最引人注目的高新技术之一。它们的出现使人类的活动领域从地球扩展到太空,无论是从军事还是从和平利用空间的角度都使人类的认识发生了极其重大的变化。

制导、导航与控制(Guidance Navigation and Control, GNC)是实现航天器和导弹飞行性能的系统技术,是飞行器技术最复杂的核心技术之一,是集自动控制、计算机、精密机械、仪器仪表以及数学、力学、光学和电子学等多领域于一体的前沿交叉科学技术。

中国航天事业历经 50 多年的努力,在航天器和导弹的制导、导航与控制技术领域取得了辉煌的成就,达到了世界先进水平。这些成就不仅为增强国防实力和促进经济发展起了重大作用,而且也促进了相关领域科学技术的进步和发展。

1987 年出版的《导弹与航天丛书》以工程应用为主,体现了工程的系统性和实用性,是我国航天科技队伍 30 年心血凝聚的精神和智慧成果,是多种专业技术工作者通力合作的产物。此后 20 余年,我国航天器和导弹的制导、导航与控制技术又有了突飞猛进的发展,取得了许多创新性成果,这些成果是航天器和导弹的制导、导航与控制领域的新理论、新方法和新技术的集中体现。为适应新形势的需要,我们决定组织撰写出版《航天器

和导弹制导、导航与控制》丛书。本丛书以基础性、前瞻性和创新性研究成果为主,突出工程应用中的关键技术。这套丛书不仅是新理论、新方法、新技术的总结与提炼,而且希望推动这些理论、方法和技术在工程中推广应用,更希望通过“产、学、研、用”相结合的方式使我国制导、导航与控制技术研究取得更大进步。

本丛书分两个部分:第一部分是制导、导航与控制的理论和方法;第二部分是制导、导航与控制的系统和器部件技术。

本丛书的作者主要来自北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、国防科学技术大学、清华大学、北京理工大学、华中科技大学和南京航空航天大学等高等学校,中国航天科技集团公司和中国航天科工集团公司所属的科研院所,以及“宇航智能控制技术”、“空间智能控制技术”、“飞行控制一体化技术”、“惯性技术”和“航天飞行力学技术”等国家级重点实验室,而且大多为该领域的优秀中青年学术带头人及其创新团队的成员。他们根据丛书编委会总体设计要求,从不同角度将自己研究的创新成果,包括一批获国家和省部级发明奖与科技进步奖的成果撰写成书,每本书均具有鲜明的创新特色和前瞻性。本丛书既可为从事相关专业技术研究和应用领域的工程技术人员提供参考,也可作为相关专业的高年级本科生和研究生的教材及参考书。

为了撰写好该丛书,特别聘请了本领域德高望重的陆元九院士、屠善澄院士和梁思礼院士担任丛书编委会顾问。编委会由本领域各方面的知名专家和学者组成,编著人员在组织和技术工作上付出了很多心血。本丛书得到了中国人民解放军总装备部国防科技图书出版基金资助和国防工业出版社的大力支持。在此一并表示衷心感谢!

期望这套丛书能对我国航天器和导弹的制导、导航与控制技术的人才培养及创新性成果的工程应用发挥积极作用,进一步促进我国航天事业迈向新的更高的目标。

丛书编委会

2010年8月

前 言

卫星姿态控制主要包括姿态测量和姿态控制。卫星的姿态表示卫星在空间中的方位,通常所谓的姿态确定就是指确定卫星本体坐标系相对于某一参考坐标系或某一特定目标的姿态。为了确定姿态,首先需要测量姿态,即用星载特定姿态敏感器获取含有姿态信息的物理量,然后进行数据处理,最终获取所需要的姿态参数。卫星姿态确定是对卫星进行控制的前提和基础。

本书以静止轨道卫星和中、低轨道卫星为重点,详细地介绍了几种典型卫星姿态测量部件的工作原理,分别针对自旋稳定卫星和三轴稳定卫星系统地阐述了相应的卫星姿态参考矢量几何确定方法和状态估计的滤波方法,并给出了相关姿态确定系统的实现过程。本书共分为8章。第1章介绍姿态测量与确定在卫星控制系统中的作用,卫星姿态测量部件研究进展情况,卫星控制系统采用的姿态确定方法;第2章介绍与姿态测量及确定的相关知识,主要包括参考坐标系、姿态描述形式和球面三角等知识;第3章和第4章分别针对自旋稳定卫星和三轴稳定卫星系统论述了相关测量敏感器原理和基于各矢量测量的卫星姿态确定方法及其实际工程应用实例;第5章介绍了基于状态估计的姿态确定方法,着重给出卡尔曼(Kalman)滤波的原理及其推导过程;第6章介绍姿态确定系统的高精度陀螺误差建模方法,并结合实际陀螺数据进行了模型有效性比对验证,为姿态确定及高精度姿态控制系统设计及仿真验证提供基础条件。第7章介绍了基于卡尔曼滤波方法在卫星系统中的应用;第8章分别结合自旋稳定卫星和三轴稳定卫星,给出了相应姿态测量与确定系统的实现过程。

本书是卫星姿态测量与确定技术的基础理论和研究成果的著作,是作

者从事卫星控制系统研制和工程实践的经验总结,凝聚了作者从事航天器控制领域工作几十年来的研究结晶。随着卫星姿态控制技术的发展,姿态测量与确定在航天领域重要性显得更加突出,但国内外还没有全面系统地介绍卫星姿态测量与确定技术的学术专著或教科书,相关技术仅在卫星控制技术著作的部分章节有所涉及。自20世纪90年代初本书中的大部分内容就一直作为中国空间技术研究院和其他高校研究生的“卫星姿态测量与确定”课程讲义,受到研究生和相关技术人员的欢迎。在此过程中,还不断吸收该领域最新研究成果对讲义进行了丰富。

本书紧密将理论与实际应用相结合,系统地介绍卫星姿态测量与确定原理和方法。全书学术思想新颖,内容具体实用,是从研制和工程实践中归纳、综合与提炼的研究成果,大部分内容经过飞行验证。许多姿态测量和确定技术不仅仅局限于卫星应用,还可推广于其他航天器。本书不仅可以作为研究生教材,还可供从事航天器控制的技术人员参考。

在本书的编写过程中得到了北京控制工程研究所吴宏鑫院士、北京航空航天大学房建成教授等专家们的指导,本书承蒙中国空间技术研究院屠善澄院士和北京航空航天大学贾英民教授审阅,并提出了许多宝贵意见,在此谨致深切谢意。作者感谢国防科技图书出版基金和国防工业出版社在本书出版过程中给予的大力支持。最后感谢在本书撰写过程中所有给予关心、支持和帮助的人们!

随着现代航天技术的迅猛发展,卫星姿态测量与确定技术也随之丰富,由于编者的水平所限,难免存在不妥和错误之处,恳请广大同行、读者批评指正。

作者

2013年2月

目 录

CONTENTS

| | | | |
|----------------------------|----|---|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 | Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 卫星姿态控制系统 | 1 | 1.1 Satellite Attitude Control System | 1 |
| 1.2 姿态测量及确定方法 | 3 | 1.2 Attitude Measurement and Determination Methods | 3 |
| 1.3 卫星姿态敏感器 | 6 | 1.3 Satellite Attitude Sensors | 6 |
| 1.4 姿态测量与确定的作用及意义 | 17 | 1.4 Functions and Significance of Attitude Measurement and Determination | 17 |
| 第 2 章 基础知识 | 21 | Chapter 2 Foundations | 21 |
| 2.1 坐标系定义及转换 | 21 | 2.1 Coordinate Definitions and Transformations | 21 |
| 2.1.1 坐标系定义 | 21 | 2.1.1 Coordinate Definitions | 21 |
| 2.1.2 坐标系之间的转换关系 | 23 | 2.1.2 Coordinate Transformations | 23 |
| 2.2 姿态描述 | 25 | 2.2 Attitude Descriptions | 25 |
| 2.2.1 方向余弦式 | 25 | 2.2.1 Direction Cosine Matrix | 25 |
| 2.2.2 欧拉轴/角式 | 27 | 2.2.2 Euler Axis / Angle | 27 |
| 2.2.3 欧拉角式 | 31 | 2.2.3 Euler Angle Rotation | 31 |
| 2.2.4 姿态四元数 | 35 | 2.2.4 Quaternions | 35 |
| 2.2.5 Rodrigues 参数 | 40 | 2.2.5 Rodrigues Parameters | 40 |
| 2.3 球面三角基础知识 | 41 | 2.3 Basic Theory of Spherical Trigonometry | 41 |
| 2.3.1 球面的基本概念及性质 | 41 | 2.3.1 Basic Concepts and Characteristics of Spherical Trigonometry | 41 |
| 2.3.2 球面三角的基本公式 | 43 | 2.3.2 Basic Formula of Spherical Triangle | 43 |
| 第 3 章 自旋稳定卫星姿态测量与确定 | 45 | Chapter 3 Attitude Measurement and Determination for Spinning Satellites | 45 |
| 3.1 自旋卫星参考矢量测量的敏感器 | 46 | 3.1 Attitude Sensors for Spinning Satellites | 46 |
| 3.1.1 太阳敏感器 | 46 | 3.1.1 Sun Sensor | 46 |
| 3.1.2 红外地球敏感器 | 47 | 3.1.2 Infrared Earth Sensor | 47 |
| 3.2 参考矢量的测量 | 48 | 3.2 Measurements of Reference Vectors | 48 |
| 3.2.1 太阳方向的测量 | 49 | 3.2.1 Measurement of Sun Vector | 49 |

| | | | | | |
|--------------------------|----------------------|-----|--|--|-----|
| 3.2.2 | 天底方向的测量 | 51 | 3.2.2 | Measurement of Geocentric Vector | 51 |
| 3.2.3 | 陆标方向的测量 | 55 | 3.2.3 | Measurement of LandMark Vector | 55 |
| 3.3 | 自旋轴方向的几何确定方法 | 57 | 3.3 | Geometric Determination Method for Spinning Axis Orientation | 57 |
| 3.4 | 太阳-地球方式姿态确定算法 | 63 | 3.4 | Attitude Determination Algorithms with Sun and Geocentric Vectors | 63 |
| 3.4.1 | 赤经赤纬法 | 64 | 3.4.1 | Right Ascension and Declination Method | 64 |
| 3.4.2 | 方向余弦法 | 66 | 3.4.2 | Direction Cosine Matrix Method | 66 |
| 3.4.3 | 测量数据不全的定姿算法 | 67 | 3.4.3 | Attitude Determination Algorithms with Insufficient Measurements | 67 |
| 3.4.4 | 基于红外地球敏感器弦宽差分的姿态确定 | 69 | 3.4.4 | Attitude Determination with Differential Values of the Earth Width | 69 |
| 3.5 | 姿态确定的几何限制 | 71 | 3.5 | Geometric Constraint Conditions of Spinning Satellite Attitude Determination | 71 |
| 3.5.1 | 测量密度 | 74 | 3.5.1 | Measurement Density | 74 |
| 3.5.2 | 相关角 | 77 | 3.5.2 | Related Angle | 77 |
| 3.5.3 | 姿态确定的几何限制 | 79 | 3.5.3 | Geometric Constraint Conditions | 79 |
| 3.6 | 卫星自旋轴常用的姿态确定(几何确定)过程 | 79 | 3.6 | Geometric Attitude Determination Procedure for Spinning Satellites | 79 |
| 3.7 | 卫星自旋轴姿态确定实例 | 81 | 3.7 | Application of Spinning Satellite Attitude Determination | 81 |
| 3.7.1 | 卫星控制系统介绍 | 81 | 3.7.1 | Introduction to Satellite Control System | 81 |
| 3.7.2 | 姿态确定在轨应用情况 | 83 | 3.7.2 | Attitude Determination Implementation Results | 83 |
| 第4章 三轴稳定卫星姿态测量与确定 | | | Chapter 4 Attitude Measurement and Determination for Three-axis Stabilized Satellites | | |
| 4.1 | 三轴稳定卫星参考矢量测量的敏感器 | 85 | 4.1 | Attitude Sensors for Three-axis Stabilized Satellite | 85 |
| 4.1.1 | 地球敏感器 | 85 | 4.1.1 | Infrared Earth Sensor | 85 |
| 4.1.2 | 射频敏感器 | 89 | 4.1.2 | RF Sensor | 89 |
| 4.1.3 | 惯性姿态敏感器 | 93 | 4.1.3 | Inertial Measurement Unit | 93 |
| 4.1.4 | 太阳敏感器 | 97 | 4.1.4 | Sun Sensor | 97 |
| 4.1.5 | 星敏感器 | 99 | 4.1.5 | Star Sensor | 99 |
| 4.1.6 | 紫外敏感器 | 100 | 4.1.6 | Ultraviolet Sensor | 100 |
| 4.1.7 | 地磁姿态敏感器 | 101 | 4.1.7 | Earth Magnetic Field Sensor | 101 |
| 4.2 | 参考矢量测量 | 104 | 4.2 | Measurement of Reference Vector | 104 |
| 4.2.1 | 天底方向的测量 | 104 | 4.2.1 | Measurement of Geocentric Vector | 104 |
| 4.2.2 | 太阳方向的测量 | 104 | 4.2.2 | Measurement of Sun Vector | 104 |
| 4.2.3 | 星光方向的测量 | 106 | 4.2.3 | Measurement of Star Vectors | 106 |

| | | | | | |
|-------|-------------------------|-----|-------|--|-----|
| 4.2.4 | 地磁场方向的测量 | 107 | 4.2.4 | Measurement of Earth Magnetic Field Vectors | 107 |
| 4.2.5 | 无线电信标方向的测量 | 108 | 4.2.5 | Measurement of Radio-Marker Vectors | 108 |
| 4.2.6 | 惯性参考方向的测量 | 109 | 4.2.6 | Measurement of Inertial Reference Vectors | 109 |
| 4.3 | 卫星三轴姿态的确定 | 112 | 4.3 | Three-Axis Attitude Determination for Satellites | 112 |
| 4.3.1 | 双矢量姿态确定方法 | 112 | 4.3.1 | Double-vector Attitude Determination Algorithm | 112 |
| 4.3.2 | 双矢量确定姿态的 精度估计 | 113 | 4.3.2 | Attitude Accuracy Evaluation for Double-vector Attitude Determination Algorithm | 113 |
| 4.3.3 | 基于太阳和地球的 姿态确定 | 114 | 4.3.3 | Attitude Determination with Sun and Geocentric Vectors Observation | 114 |
| 4.3.4 | 偏航角的确定 | 115 | 4.3.4 | Satellite Yaw Angle Determination | 115 |
| 4.3.5 | 基于星敏传感器测量的 姿态确定 | 121 | 4.3.5 | Attitude Determination with Star Sensor Measurement | 121 |
| 4.3.6 | 用 GPS 确定卫星三轴姿态 | 123 | 4.3.6 | Attitude Determination with GPS Data | 123 |
| 4.3.7 | 基于 QUEST 的三轴姿态 确定方法 | 125 | 4.3.7 | QUEST Algorithm for Three- Axis Attitude Determination | 125 |
| 4.3.8 | 利用轨道罗盘确定卫星 三轴姿态 | 127 | 4.3.8 | Attitude Determination with Gyro Compass System | 127 |
| 4.4 | 卫星三轴姿态几何定姿应用实例 | 130 | 4.4 | Applications of Satellite Attitude Determination with Geometric Methods | 130 |
| 4.4.1 | 中、低轨道卫星对地 三轴姿态的确定 | 130 | 4.4.1 | Attitude Determination for Medium and Low Orbit Satellites | 130 |
| 4.4.2 | 地球同步轨道卫星对地 三轴的姿态确定 | 137 | 4.4.2 | Attitude Determination for Synchronous Satellites | 137 |
| 4.5 | 基于地球扁率的圆锥红外地球 敏传感器算法 | 140 | 4.5 | Correction Algorithms of Scanning Horizon Earth Sensor for Earth Oblateness | 140 |
| 4.5.1 | 红外地球敏传感器的椭圆 测量模型误差修正 | 140 | 4.5.1 | Mathematical Model of Attitude Correction | 140 |
| 4.5.2 | 红外地球敏传感器 测量值修正 | 144 | 4.5.2 | Measurement Correction of Scanning Horizon Earth Sensor | 144 |
| 4.6 | 三轴稳定卫星几何定姿过程 | 147 | 4.6 | Geocentric Attitude Determination Procedure for Three-axis Stabilized Satellites | 147 |

| | | | |
|--------------------------|-----|---|-----|
| 第5章 姿态确定的状态估计 | 149 | Chapter 5 State Estimation Methods for Satellite Attitude Determination | 149 |
| 5.1 概述 | 149 | 5.1 Introduction | 149 |
| 5.2 最小二乘估计 | 158 | 5.2 Least Squares Methods | 158 |
| 5.2.1 批处理的最小二乘法 | 158 | 5.2.1 Batch Least-Squares Methods | 158 |
| 5.2.2 递推最小二乘法 | 159 | 5.2.2 Recursive Least-Squares Methods | 159 |
| 5.3 最小方差估计 | 161 | 5.3 Minimum Variance Estimation | 161 |
| 5.4 线性最小方差估计 | 162 | 5.4 Linear Minimum Variance Estimation | 162 |
| 5.5 正交投影 | 164 | 5.5 Orthogonal Projection | 164 |
| 5.6 卡尔曼滤波 | 169 | 5.6 Kalman Filtering Methods | 169 |
| 5.6.1 滤波的定义 | 169 | 5.6.1 Filtering Definition | 169 |
| 5.6.2 卡尔曼滤波方程的推导 | 170 | 5.6.2 Derivation of Kalman Filtering Equations | 170 |
| 5.6.3 卡尔曼滤波一般方程 | 179 | 5.6.3 Kalman Filtering General Equations | 179 |
| 5.6.4 卡尔曼滤波在有色噪声线性系统中的应用 | 181 | 5.6.4 Kalman Filtering for Linear Systems with Colored Noise | 181 |
| 5.6.5 卡尔曼滤波在非线性系统中的应用 | 183 | 5.6.5 Kalman Filtering for nonlinear Systems | 183 |
| 5.7 分散滤波与联邦滤波器 | 188 | 5.7 Decentralized Filtering and Federal Filtering | 188 |
| 5.8 量测系统的几个概念 | 189 | 5.8 Serval Concepts of Attitude Measurement System | 189 |
| 5.8.1 量测系统的能观性和能控性 | 189 | 5.8.1 Observability and Controllability of Attitude Measurement System | 189 |
| 5.8.2 滤波系统的稳定性判据 | 191 | 5.8.2 Stability Criteria of Filtering Systems | 191 |
| 5.8.3 量测系统的能观度和状态估计精度 | 193 | 5.8.3 Observability Index and State Estimation Accuracy of Attitude Measurement Systems | 193 |
| 5.8.4 冗余量测与能观度 | 193 | 5.8.4 Observability and Observability Index of Systems with Redundant Measurements | 193 |
| 第6章 姿态确定中的陀螺误差建模 | 195 | Chapter 6 Modeling of Gyros in Attitude Determination | 195 |
| 6.1 概述 | 195 | 6.1 Introduction | 195 |
| 6.2 光纤陀螺随机误差建模 | 197 | 6.2 Modeling of Fiber Optic Gyros | 197 |
| 6.2.1 光纤陀螺的误差特性 | 197 | 6.2.1 Measurement Characteristic of Fiber Optic Gyros | 197 |
| 6.2.2 光纤陀螺的模型形式 | 199 | 6.2.2 Error Model for Fiber Optic Gyros | 199 |

| | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|-----|---|---|-----|
| 6.2.3 | Allan 方差法 | 202 | 6.2.3 | Allan Variance Method | 202 |
| 6.2.4 | 仿真分析 | 204 | 6.2.4 | Simulation Analysis | 204 |
| 6.3 | 三浮陀螺随机误差建模 | 207 | 6.3 | Modeling of floated gyros with gas and magnetic suspension | 207 |
| 6.3.1 | 随机误差模型形式 | 208 | 6.3.1 | Random Error Model | 208 |
| 6.3.2 | 模型参数获取方式 | 210 | 6.3.2 | Identification of Model Parameters | 210 |
| 6.3.3 | 模型验证 | 212 | 6.3.3 | Model Verification | 212 |
| 6.3.4 | 仿真分析 | 212 | 6.3.4 | Simulation Analysis | 212 |
| 6.4 | 陀螺模型递推数学表达式 | 214 | 6.4 | Iterative Equations of Gyro Model | 214 |
| 第7章 卡尔曼滤波在卫星姿态确定中的应用 | | | Chapter 7 Applications of Kalman Filtering in Satellite Attitude Determination | | |
| 7.1 | 概述 | 218 | 7.1 | Introduction | 218 |
| 7.2 | 自旋稳定控制卫星的姿态确定 | 219 | 7.2 | Attitude Determination for Spinning Satellites | 219 |
| 7.3 | 基于太阳-地球测量的三轴稳定卫星姿态确定方法 | 221 | 7.3 | Three-Axis Attitude Determination with Geocentric Vector and Sun Vector Observation | 221 |
| 7.4 | 基于星敏感器测量的三轴稳定卫星姿态确定方法 | 228 | 7.4 | Three-Axis Attitude Determination with Star Sensor Measurements | 228 |
| 7.4.1 | 基于扩展卡尔曼滤波的姿态确定 | 228 | 7.4.1 | Extended Kalman Filtering for Attitude Determination with Star Sensors and Gyros | 228 |
| 7.4.2 | 具有短周期测量误差的姿态确定 | 233 | 7.4.2 | Attitude Determination for Measurement Data with Low Frequency Errors | 233 |
| 7.4.3 | 基于非线性鲁棒滤波的姿态确定 | 243 | 7.4.3 | Nonlinear Robust Kalman Filter for Satellite Attitude Determination | 243 |
| 第8章 卫星姿态确定系统的实现 | | | Chapter 8 Satellite Attitude Systems Design | | |
| 8.1 | 自旋稳定卫星的姿态确定系统 | 253 | 8.1 | Attitude Determination System Implementation for Spinning Satellites | 253 |
| 8.2 | 三轴姿态稳定卫星的姿态确定系统 | 257 | 8.2 | Attitude Determination System Implementation for Three-Axis Stabilized Satellites | 257 |
| 8.2.1 | 卫星姿态确定系统配置 | 260 | 8.2.1 | Configuration of Satellite Attitude Determination System | 260 |
| 8.2.2 | 在轨姿态确定方法及实现 | 261 | 8.2.2 | On-Board Attitude Determination Methods and System Implementation | 261 |
| 8.2.3 | 地面姿态确定方法及实现 | 267 | 8.2.3 | Ground-based Attitude Determination Methods and System Implementation | 267 |
| 参考文献 | | | References | | |
| | | 271 | | | 271 |